

频谱分解技术在南黄海 崂山隆起的应用

王建强, 陈建文, 梁 杰, 孙 晶

(国土资源部资源部海洋油气与环境地质重点实验室, 青岛 266071;
海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071;
中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘 要:频谱分解技术是将地震信号从时间域转换到频率域, 分析振幅、相位在频率域的变化。频谱分解能够得到高于常规地震剖面分辨率的成像效果, 提高不同地质体对信号的响应能力。针对南黄海崂山隆起碳酸盐岩, 通过对比短时傅里叶变换、连续小波变换和 S 变换等不同算法的频谱分解方法, 探讨了各自的适用特点, 最后优选出 S 变换对南黄海崂山隆起地震资料进行频谱分解。结果表明, 该项技术提高了地震分辨率, 为研究区储层和断层识别奠定了基础。

关键词:频谱分解; 碳酸盐岩; 南黄海; 崂山隆起

中图分类号:P631.443 **文献标识码:**A **DOI:**10.16028/j.1009-2722.2016.10006

频谱分解技术于 20 世纪 80 年代开始应用于地震资料解释中, 将地震信号从时间域转换到频率域, 分析振幅、相位在频率域的变化, 地震分频解释技术是在短时窗内通过频谱分解来研究薄层变化, 在频率域通过调谐振幅或相位来研究地层横向变化规律, 可以提高地震资料对薄储层的分辨能力、提取出比常规地震属性更丰富的地质信息、提高对特殊地质体的识别能力, 从而精细描述储层展布、物性及含油气性, 是一种基于频谱分析的全新地震成像解释方法^[1,2]。频谱分解技术能

够区分一定时间域内不同频率成分的相互干扰, 获取优于原始地震资料分辨率的解释结果。

近年来, 频谱分解技术已经广泛应用于地球物理勘探各个领域。王西文等^[3]利用小波变换, 得到分频瞬时相位, 计算地震相干体, 提高了在地震资料解释中对于断层的识别; 袁志云等^[4]采用频谱分解技术, 得到优于常规地震属性的成像效果, 对目的层进行了断裂识别、沉积相分析及储层横向预测; 张亚中等^[5]将频谱分解技术应用在碳酸盐岩缝洞型储层预测中, 对比储层与地震反射特征关系, 总结了储层发育的特征, 刻画了储层边界; 李劲松等^[6]在研究陆相岩性油气藏过程中引入了频谱分解技术, 成果应用在层序地层划分、薄储层识别及地震相研究等方面; 陈波等^[7]利用时频连续小波变换, 得到高频地震数据体, 提高了对地震体小断层的识别能力; 胥良君等^[8]采用傅里叶变换、连续小波变换提高了生物礁地震反射特征, 进行了含油气检测。总之, 随着勘探程度提高, 频谱分解技术已得到广泛应用, 已由最初的

收稿日期: 2016-08-30

基金项目:南黄海油气资源调查(DD20160512); 南黄海前三系油气前景研究(XQ-2005-01); 南黄海水域油气资源普查(GZH200800503); 南黄海崂山隆起和滩海区海相地层油气资源战略选区(XQ-2009-15); 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室基金(MRE201311)

作者简介:王建强(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事盆地分析及油气地质万面的研究工作. E-mail: wangjianqiang163@163.com

碎屑岩薄层厚度预测发展到断裂系统识别、碳酸盐岩储层预测、含油气性检测、油藏边界圈定等。本文主要是利用该技术在南黄海盆地崂山隆起碳酸盐岩储层中,对比不同算法的成像效果,以得到优于常规剖面的地震反射特征,提高断层识别及储层刻画能力。

1 频谱分解原理

频谱分解技术作为一种地震分频技术,核心是瞬时频率分析,利用小波变换和匹配追踪相结合,逐一将地震道进行频谱分解,从而得到地震资料每一道、每一时间点、每一频率精确的频率分布曲线数据以及每个时间采样点的频谱分析结果。

频谱分解技术是在一个时间窗口内,利用离散傅氏变换,将时间域地震数据转换到频率域,在频率域分析地震数据特征。

一个简单的各向同性的薄层能把预测的、具有周期性的带陷序列引入到复合反射的振幅谱中(图 1),该带陷序列周期的倒数等于薄层的时间厚度。然而,地震子波在反射过程中一般都经过多个层位而不是简单的穿越一个薄层。地层中连续反射导致了复杂的调谐反射,而这种调谐反射具有独特的频率域响应。采用短时窗做频谱分析时,由于短时窗内只包括局部的几个薄层反射界面,这样地震波的振幅谱和子波的频谱就出现了形态上的差异,由此识别出不同频率域的地震振幅和相位异常。

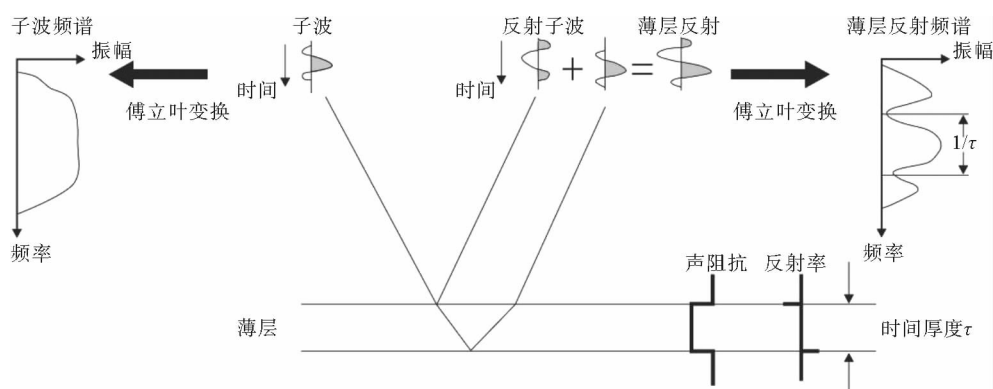


图 1 薄层反射频谱成像

Fig. 1 Thin layer reflection spectrum imaging

频谱分解概念基于在频率域范围内薄层反射具有指示时间地层厚度的特征性表现。实际地震波信息是由多个薄层反射产生的复杂的调谐反射,是多个砂泥岩互层的综合响应,每个薄层反射经傅里叶变换后,会产生一个在频率域相对应的反射,地震分频信息可以有效识别储集层时间厚度变化及检测地质体横向上的不连续性^[9],其基本算法是采用离散傅里叶变换(DFT)或最大熵方法,公式为^[10]:

$$F(m\Delta f) = \Delta t \sum_{m=0}^{N-1} f(n\Delta t) e^{-2\pi j m \Delta f n \Delta t} \quad (1)$$

式中: m 为频率域采样数;

n 为时间域采样数;

N 为时间域地震采样总数;

Δf 为频率域地震采样总数;

Δt 为时间域采样间隔。

通过对地震资料进行频谱分解,产生一系列单一频率的振幅调谐体和离散频率能量体。在不同频率的地震振幅调谐体上,薄层干涉特征明显。一定频率的振幅调谐体对不同厚度薄层的刻画是不同的,当薄层的调谐频率与振幅调谐体的频率相同时,薄层干涉特征最明显,此时,振幅调谐体对薄层地质体的刻画最客观。离散频率能量数据体对储层非常敏感,频率的空间变化可以指示薄层的声学特征及其厚度的横向变化。将振幅的调谐干涉和频率的变化综合在一起,就可以有效地确定储层的厚度及其横向上不连续性。对储层的空间变化特征进行描述常用算法有短时傅里叶变换(STFT)、连续小波变换(CWT)和 S 变换(ST)等。

2 时频分析方法

2.1 短时傅里叶变换(STFT)

短时傅里叶变换(STFT)建立在傅里叶变换基础上的时频分析方法,利用固定时窗,对信号进行局部分析,是一种广泛的频谱分解方法。其表达式^[11]为:

$$H(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) g * (t - \tau) e^{-2\pi i f t} dt$$

短时傅里叶变换(STFT)其自身特点,时窗在变换过程中不能改变,造成时频分析过程中具有一定局限性,适合平稳信号或近似平稳信号处理,不利于时变信号分析。

2.2 连续小波变换(CWT)

连续小波变换(CWT)是在短时傅里叶变换(STFT)基础上发展起来的,其时窗是一小波基函数,利用其变换对信号进行时频分析。其表达式为:

$$W_{\varphi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi * \left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

连续小波变换(CWT)在信号处理过程中是将时间—尺度信息转换为时间—频带信息,所得到的时频信息对应着一个频带,导致能量出现交叠情况,高频时更为严重,导致高频信号能量衰减^[12,13]。

2.3 时频连续小波变换(TFCWT)

时频连续小波变换(TFCWT)是对连续小波变换(CWT)改进,通过对连续小波结果进一步加权,有利于刻画信号不同频率成分,大大提高了全频带范围内时频分辨率,具有更好的时频聚集性,对不同信号分量有更强的分辨力^[14]。其表达式为:

$$W(t, \omega) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} W T_x(a, t) \psi(a\omega) e^{-\omega t} \frac{1}{a^{\frac{1}{2}}} da$$

2.4 S变换(ST)

S变换(ST)提供时间和频率联合函数,能更好地实现时频局部化分析,其表达式为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{f^2}{2} \left(\frac{\tau-t}{f}\right)^2\right]} e^{-2\pi i f t} dt$$

S变换能够根据频率调节时窗分析信号,在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较低的时间分辨率和较高的时间分辨率,这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点。S变换具有多分辨时频分析的特征,对数据处理的适应性较强。

3 频谱分解技术在南黄海的应用

南黄海位于下扬子板块,是下扬子向海域的延伸,西接下扬子苏北盆地,东临京畿地块,北起千里岩断裂,南至江绍断裂。现今的南黄海盆地为海相中—古生界与陆相中—新生界的叠合盆地。根据中—新生界构造划分,南黄海划分为3个一级构造单元,从南向北依次为勿南沙隆起、南黄海盆地、千里岩隆起,其中南黄海盆地划分3个二级构造单元,从南向北依次为青岛坳陷、崂山隆起、烟台坳陷(图2)。崂山隆起为本研究的目标区,位于南黄海盆地中部。根据下扬子陆区露头、钻井和南黄海钻井资料及地震反射结构,认为南黄海沉积了与下扬子陆域相同的海相中—古生界,主要发育震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系和下三叠统青龙组,其中石炭系—下三叠统青龙组是本次研究的目的层段。石炭系—下三叠统青龙组岩性总体特征为:石炭

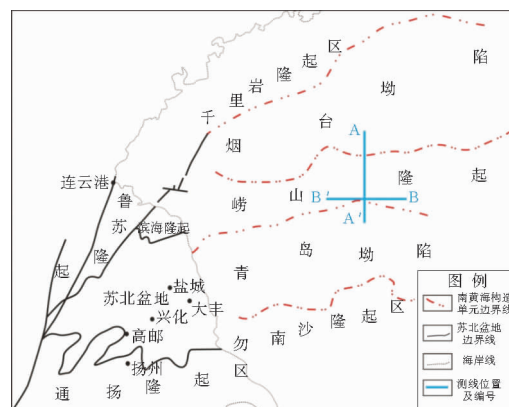


图2 南黄海崂山隆起区构造位置

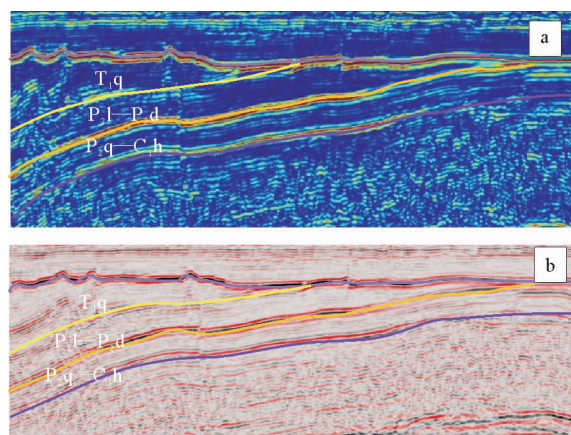
Fig. 2 Tectonic location of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

系一下二叠统栖霞组和下三叠统青龙组主要为碳酸盐岩;上二叠统龙潭一大隆组为碎屑岩夹煤层。由于岩性的差异,地震反射结构存在较强的差异性。本次采用前面所述的频谱分解技术对石炭系一下三叠统青龙组的地震成像进行研究,为后续的地震层序解释提供依据。

前已对频谱分解理论进行对比,但是在实际过程中,由于在地震资料采集、处理过程中会遇到不同的问题,因此,将地震资料按不同的时频方法进行分解对比优选。对地震资料分别进行短时傅里叶变换、连续小波变换、S 变换等,选用主频附近 25 Hz 分频地震剖面进行分析。

图 3 中可以看出,地震剖面进行短时傅里叶变换,比原始地震剖面的断层和地层特征清晰。另外,短时傅里叶变换固定时窗,对比分析不同时窗大小剖面可见(以 15 ms 和 50 ms 为例),长时窗有助于采集数据样本的范围变得更宽,生成的声学属性统计解释更佳;短时窗有助于分辨高频同相轴,也有利于区分类似或邻近主频的同相轴。然而,如果时窗太长,则不能分辨小尺度同相轴;如果时窗过短,则可能会忽略低频处的同相轴并降低分辨率。

由图 4 左侧同一地震道生产的频率道集对比看出,频率域信号分辨率越来越高。短时傅里叶

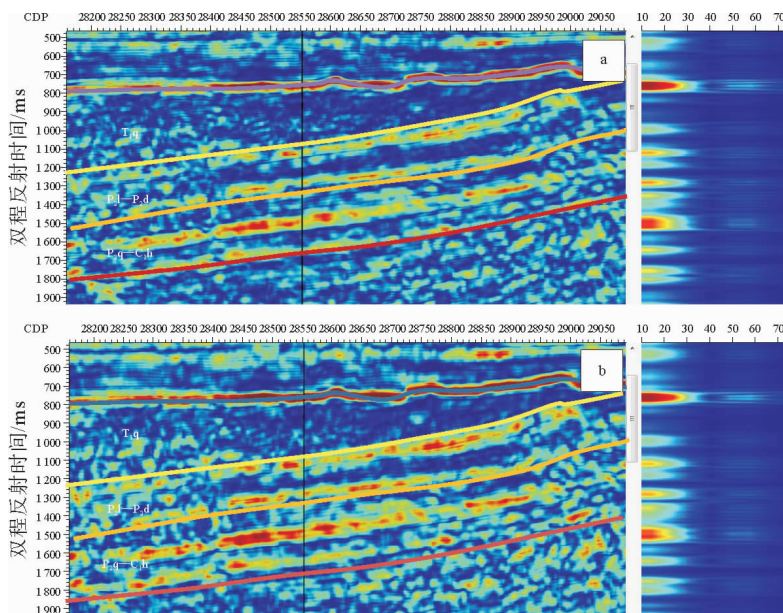


(a) 傅里叶变换剖面; (b) 原始地震剖面

图 3 原始地震剖面与傅里叶变换对比

Fig. 3 Comparison of original seismic profile and the profile after Fourier transform

变换由于在固定窗口上的平均化信号响应作用,道集显示的同相轴模糊不清;连续小波变换道集较短时傅里叶变换道集提高了分辨率,其分辨单个同相轴的能力强于短时傅里叶变换道集,这是因为短时傅里叶变换道集采用移动窗口,允许自适应地震道采样,解释窗口中信号的效果更好;时频连续小波变换生成任意同相轴上准确频率的时间-频率谱,在低频端,时频连续小波变换在保持较高时间分辨率的同时,频率分辨率得到了很大的提高;在高频端,在保持较高频率分辨率的同



(a) 傅里叶变换 25 ms 剖面; (b) 傅里叶变换 45 ms 剖面

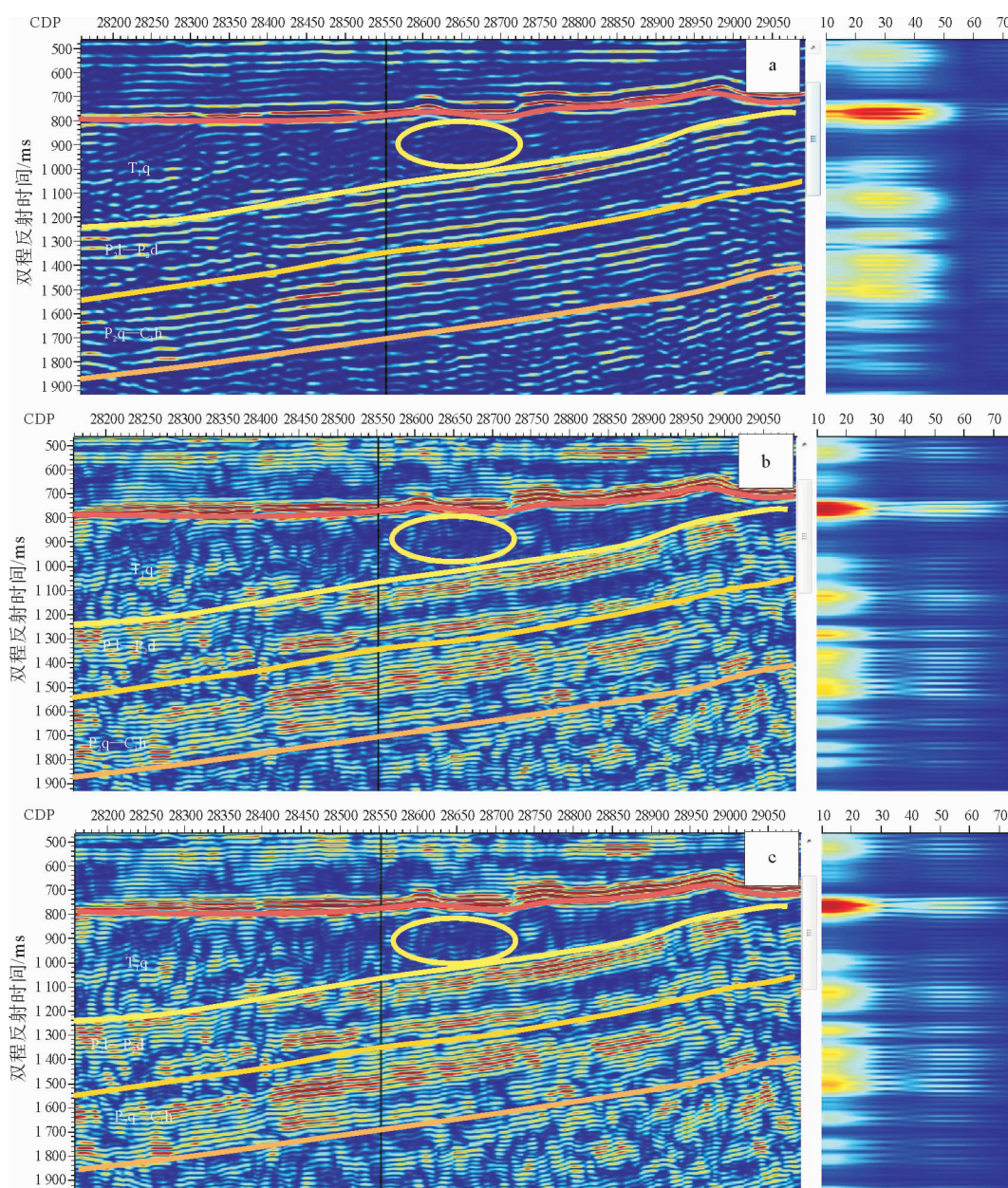
图 4 傅里叶变换不同时窗剖面

Fig. 4 The different time window profile after Fourier transform

时,时间分辨率的结果也比连续小波变换的高。时频连续小波变换算法的缺点是计算密集性,运用这种算法非常耗时。S变换与时频连续小波变换类似,能够生成显示任意同相轴上准确频率的时间—频率图,计算时间比时频连续小波变换短。因此,优选S变换方法用于南黄海崂山隆起区的实际资料分析。在地震资料有效频带内,随着频率的增大,小断层的断面特征会

更加清晰。所以在S变换基础上,选用25 Hz分频数据体进行识别。

通过常规地震剖面与其分频剖面(图5)对比可以看出:分频剖面对断点的刻画比常规剖面更为清晰,在常规地震剖面上有的断层模糊不清,有的断层表现为2个反射同相轴相交,但在分频剖面上断点都有清晰显示,这说明基于分频剖面的解释会大大提高断层的解释精度。



(a)连续小波变换剖面;(b)时频连续小波变换剖面;(c)S变换剖面

图5 不同算法分频剖面

Fig. 5 Cross section upon different algorithms

4 结论

(1)频谱分解技术提高了地震反射结构的分辨率,突出了目的层相位特征,能更好地刻画地层细节形态特征,尤其是断层的刻画。

(2)通过频谱分解技术不同方法成像效果分析认为,时频连续小波变换和S变换的地震成像效果较好,同时,S变换具有计算时间短的优点。

(3)频谱分解技术处理效果显示,石炭系一下三叠统青龙组总体呈较强反射和弱反射相间特征,即石炭系一下二叠统栖霞组碳酸盐岩为较强反射,上二叠统龙潭一大隆组为较弱夹较连续反射特征,下三叠统青龙组为较弱杂乱反射。

参考文献:

- [1] 蔡 瑞. 谱分解技术在储层预测中的应用[J]. CT理论与应用研究, 2003, 12(2): 22-25.
- [2] 张延章, 尹寿鹏, 张巧玲, 等. 地震分频技术的地质内涵及其效果分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 64-66.
- [3] 王西文, 杨孔庆, 周立宏, 等. 基于小波变换的地震相干体算法研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 847-852.
- [4] 袁志云, 孔令洪, 王成林, 等. 频谱分解技术在储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(增刊): 11-15.
- [5] 张亚中, 赵裕辉, 鲁新便, 等. 频谱分解技术在塔里木盆地北部TH地区碳酸盐岩缝洞储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(增刊): 16-20.
- [6] 李劲松, 李艳东, 张 昕, 等. 谱分解技术在岩性油气藏描述叶中的应用[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2): 239-241.
- [7] 陈 波, 魏小东, 任敦占, 等. 基于谱分解技术的小断层识别[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 890-894.
- [8] 胥良君, 李录明, 党录瑞, 等. 频谱分解在生物礁储层油气检测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(5): 544-548.
- [9] 于 豪, 李劲松, 张 研, 等. 频谱分解技术在断层与储层识别中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(6): 954-959.
- [10] 李世雄, 刘家琦. 小波变换和反演数学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [11] 胥良君, 李录明, 党录瑞, 等. 频谱分解在生物礁储层油气检测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(5): 544-548.
- [12] 高 刚, 桂志先, 贺振华, 等. 时频连续小波变换检测含气储层及其在苏里格气田的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1): 58-63.
- [13] 于 豪, 张 研, 李劲松, 等. 基于频谱分解的碳酸盐岩储层识别[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1440-1446.
- [14] 吴淑玉, 刘 俊. 时频分析在北黄海东部坳陷中生界储层的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(1): 191-196.

APPLICATION OF SPECTRUM DECOMPOSITION TO THE LAOSHAN UPLIFT, SOUTH YELLOW SEA

WANG Jianqiang, CHEN Jianwen, LIANG Jie, SUN Jing

(Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of land and Resources, Qingdao 266071, China; Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: Spectrum decomposition is the technique to convert seismic signals from time domain to frequency domain, and to provide the opportunity to study the changes in both amplitude and phase in the frequency domain. Resolution of the spectral decomposition can be higher than the results of conventional seismic interpretation, and the response capacity of the signal to different geological bodies are improved. There are great amount of carbonate reservoirs on the Laoshan Uplift in the South Yellow Sea. By comparison of the calculation and application results of the short-time Fourier transform, continuous wavelet transform and S transform of the spectrum decomposition methods, finally we recommended the S transformation as the tool to process the seismic data from the Laoshan uplift. Facts show that this technology may improve the seismic resolution, and help the identification of reservoirs and faults in the studied area.

Key words: spectrum decomposition; carbonate; South Yellow Sea; Laoshan Uplift